

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физ.-мат. наук,

профессора Балакшия В.И.

на диссертацию Анненковой Елены Александровны

«Нелинейная динамика пузырьков и капель под воздействием
интенсивных акустических волн», представленную на соискание

учёной степени кандидата физико-математических наук

(специальность 01.04.06 – «Акустика»)

Актуальность темы диссертации

Работа Е.А. Анненковой посвящена исследованию нелинейной динамики парогазовых пузырей и жидких капель, возникающих в жидкостях и гелеобразных средах под воздействием мощного фокусированного ультразвука, в частности, в мягких биологических тканях во время процедур ультразвуковой диагностики и терапии. В работе ставятся и решаются в основном теоретические задачи, возникшие в связи с исследованиями по воздействию интенсивных акустических волн на биологические ткани, такие как обнаружение и определение размера пузырей кипения, превосходящих по размеру кавитационные пузырьки, но в то же время имеющих размеры меньше разрешающей способности ультразвуковых диагностических сканеров, описание нелинейной динамики пузырей в перегретой фокальной области действия ультразвукового источника, описание нелинейных процессов в акустическом микрофонтане внутри таких пузырей.

В настоящее время во всем мире активно ведутся разработки и усовершенствования медицинских приборов нового поколения, среди которых отдельной группой выделяются приборы, основанные на методе механического разрушения ткани (гистотрипсии) с помощью ультразвуковых источников. В этих приборах используются не непрерывные сигналы, а последовательность акустических импульсов, что позволяет минимизировать тепловые эффекты и сделать преобладающим механический эффект от

активности пузырьков. Существует ряд проблем, связанных с практическим применением метода, в основном обусловленных стохастической природой кавитации. Следовательно, разработка новых подходов к гистотрипсии, которые позволят получить надежное и воспроизводимое механическое разрушение ткани, представляет значительный интерес. Это говорит о том, что тема данной диссертации является несомненно актуальной.

Новизна основных выводов и результатов работы

Новизна основных выводов и результатов диссертационной работы состоит в том, что соискатель впервые разработал алгоритмы по анализу ультразвуковых изображений объектов, сильно рассеивающих акустические волны и имеющих размеры меньше разрешающей способности прибора по ультразвуковой диагностике. Оригинальными являются система уравнений, полученная для теоретических расчётов нелинейной динамики парогазового пузыря в перегретой области конечного размера, и математическое описание модели нелинейного акустического резонатора в виде жидкой сферы с абсолютно мягкой границей. Автор диссертации также впервые исследовал нелинейную динамику стоячих акустических волн в сферической капле жидкости.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Все основные выводы, научные положения и рекомендации, сформулированные автором в тексте диссертации и автореферата, в достаточной мере обоснованы и являются научными фактами.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием проверочных численных и физических экспериментов и тем, что результаты экспериментов соответствуют априорной информации и теоретическим расчётам.

Ценность для науки и практики

Ценность данной диссертационной работы для науки и практики состоит в представлении метода анализа размеров сильно рассеивающих объектов,

который может быть применён в ультразвуковом мониторинге возникновения кипения в мягких биотканях в процессе их нагрева фокусированным ультразвуком. Также возможной областью применения результатов работы могут быть гидроакустические, биофизические и другие исследования, где в качестве теоретической модели процесса выступает нелинейный акустический резонатор сферической формы.

Общая оценка диссертационной работы

Данная диссертационная работа выполнена на актуальную тему, направленную на исследование нелинейной динамики парогазовых пузырей и жидких капель, возникающих в мягких тканях во время процедур ультразвуковой диагностики и терапии. Представление и обсуждение результатов диссертационной работы осуществлялось на многих российских и международных конференциях по волновым процессам, нелинейной акустике и медицинскому ультразвуку. У соискателя имеется необходимое количество статей в журналах, индексируемых в системах Web of Science, RSCI и Scopus. Опубликованные работы в полной мере отражают основные результаты диссертации. Автореферат корректно отражает ее основное содержание.

Диссертация состоит из общего вводного раздела, четырёх глав, заключения, приложения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитированной литературы.

Во **введении** представлены актуальность работы, цель и задачи работы, методы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы защищаемые положения.

Первая глава посвящена проблеме ультразвукового зондирования и визуализации пузырьков миллиметрового размера в мягкой биологической ткани. Описан эксперимент по сопоставлению коэффициентов отражения ультразвуковой волны в воде от плоской границы раздела с пенопластом и воздухом. Получены теоретические диаграммы рассеяния абсолютно мягкой сферы и экспериментальные диаграммы рассеяния от сферического

пенопластового образца, используемого в качестве модели мягкой сферы. Рассчитаны импульсные сигналы, рассеянные на абсолютно мягкой сфере. Описан эксперимент по ультразвуковой визуализации моделей пузырьков газа, подтвердивший, что сферические пенопластовые шарики можно использовать в качестве моделей пузырьков газа.

Во **второй главе** проанализирован рост парогазового пузырька в перегретой области конечного размера и излучение им сферических акустических волн. Дан обзор литературы по экспериментальным данным роста парогазовых пузырьков в перегретой жидкости, выведены эволюционные уравнения для основных параметров задачи нелинейной динамики парогазового пузырька в перегретой области достаточно малого размера и получены уравнения для температуры на границе пузырька.

В **третьей главе** представлены теоретическая модель динамики внутри капли акустического фонтана и результаты численных экспериментов, проведённых на основе данной теоретической модели. Выведены исходные уравнения, получено решение задачи методом медленно меняющихся амплитуд и методом медленно изменяющегося профиля попеременно сходящейся и расходящейся акустической волны. Установлена связь уравнения для динамики акустического поля в капле с уравнением Бюргерса. Рассчитаны спектр и временной профиль акустического давления в центре капли, получены характеристики акустического поля в объёме капли и приведён пример расчёта акустического давления в капле акустического фонтана.

В **четвёртой главе** проанализирована температура в центре капли акустического фонтана, проверено наличие условий для возникновения в ней эффекта кавитации, описана динамика пузырька, образованного в ее центре. Исследованы неустойчивые явления в акустически возбужденной сферической капле жидкости в пренебрежении вязкости жидкости, а также при ее учёте. Построены зоны неустойчивости поверхности капли.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной

работы.

В целом по итогам рассмотрения текста диссертации и автореферата сложилось самое благоприятное впечатление о диссертационной работе Е.А. Анненковой как с точки зрения уровня проведённых исследований, так и полученных автором научных результатов. Работа представляет собой важный вклад в разработку фундаментальных вопросов медицинской акустики, имеет большую практическую ценность. Стил ь изложения материалов диссертации – чёткий, диссертация и автореферат хорошо иллюстрированы. Диссертация свидетельствует о высоком уровне квалификации соискателя, включая способность получать и анализировать результаты проведенных научно-исследовательских работ.

Вместе с тем можно отметить, что диссертационная работа не лишена недостатков.

1. Первый пункт выводов о разработке способа оценки размера газового пузырька на основе измерения амплитуды эхо-сигнала в условиях, когда размер пузырька меньше разрешения сканера, представляется слишком сильным, поскольку даже в модельном эксперименте автором не показана численная корреляция между размером пузырька и амплитудой его эхо-сигнала.

2. Вызывает недоумение рис. 3.2, на котором показаны гармоники акустического давления в центре сферического резонатора от времени. Максимальная амплитуда второй гармоники составляет 65% от исходной амплитуды, а сотой (!) гармоники – 14% в тот момент, когда первая гармоника уменьшилась всего лишь на 23%. Все ли здесь в порядке с законом сохранения энергии?

3. На рис. 2.7 представлена зависимость радиуса пузырька от времени без учета (прямая линия) и с учетом (кривая линия) неравновесного парообразования. Непонятно, почему у этих графиков разные начальные точки.

4. Диссертационная работа имеет в основном теоретический характер.

Решаются очень сложные задачи линейной и нелинейной акустики. Поэтому не удивительно, что текст диссертации сильно математизирован. Но к сожалению, далеко не всегда окончательные формулы детально обсуждаются с физической точки зрения. Как пример, могу привести конец раздела 2.2. Приводятся сложные интегральные формулы (2.16) и (2.17), в которых интегрирование ведется по величинам с размерностью м^3 и $\text{м}^4/\text{с}$. И далее идет заключительная фраза: "Результаты расчетов приведены на рис. 2.5". А этот рисунок имеет подпись: "Решения начальной и граничной краевых задач для температуры". И больше никакого комментария к рисунку.

Тем не менее, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.06 – «акустика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Работа оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Анненкова Елена Александровна несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – «акустика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики колебаний физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Балах

В.И. Балакший

28.05.2018

Дата подписания

Адрес места работы:

119991, Москва, ул. Ленинские горы 1, стр. 2

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра физики колебаний

Тел.: +7 (495) 939-4697; e-mail: balakshy@phys.msu.ru

Подпись сотрудника физического факультета

Балакшиха Владимира Ивановича удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета,

профессор



 Караваев В.А.

Дата

28/V 2018 г.